



光学的測定に基づく標準マイクロフォン高精度校正法の研究

著者	徐 載甲
号	63
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	情博第683号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00127256

氏名	徐 載甲(ソ ジェガブ),
学 位 の 種 類	博 士 (情報科学)
学 位 記 番 号	情 博 第 683 号
学位授与年月日	平成31年 3月27日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科、専攻	東北大学大学院情報科学研究科(博士課程)システム情報科学 専攻
学位論文題目	光学的測定に基づく標準マイクロフォン高精度校正法の研究
論文審査委員	(主査) 東北大学教 授 鈴木 陽一 東北大学教 授 川又 政征 東北大学教授 木下 哲男 東北大学准教授 坂本 修一

論 文 内 容 の 要 旨

第1章 序論

マイクロフォンは音を電気信号に変換する装置であり、その物理特性には、感度、周波数応答、指向性、出力インピーダンス、固有雑音等がある。その中で一番重要な特性は、感度と周波数特性である。マイクロフォンの感度は、音圧の大きさを正確に定量化する物理的特性であり、単位音圧の入力に対する出力電圧の比で定義される。音響測定分野では、高精度な音圧校正を行い、定期的に感度の値を追跡・維持したマイクロフォンを準備し、それを音圧校正の中核として用いる。このようなマイクロフォンを標準マイクロフォンと呼ぶ。

標準マイクロフォンの感度校正法として、その測定精度の安定性から可逆校正法が最も優れた方法と考えられ、標準マイクロフォン校正の国際標準として規格化されている。しかし、この可逆校正法は、多くの時間と細心の注意を要するため、必要に応じこの方法を適用して感度を決定することは容易ではない。可逆校正法には、次のような四つの問題点がある。

- (1) 一つのマイクロフォンで測定することが不可能である。
- (2) 手続きが複雑である。
- (3) 測定時間が長い。
- (4) 20Hz より低い周波数帯域の測定が不可能である。

本研究では、先述の(1)～(3)番目の問題点を解決するために、マイクロフォンのダイヤフラム表面振動測定による感度導入に着目し、1 個のマイクロフォンでの感度決定を目指した。そのために、レーザ振動計を用いたダイヤフラムの振動測定に基く感度測定方法を検討した。(4)番目の問題点を克服するために、光学的測定システムと正弦波近似法を組み合わせ、レーザ干渉計を用いた低周波数領域におけるマイクロフォンの感度測定法を提案した。最後に、提案したレーザ干渉計を用いた測定手法を拡張し、可聴周波数帯域だけではなく、低周波数から高周波数までの広範囲にわたり標準マイクロフォンの高精度校正が可能な測定システムを提案する。

第2章 標準マイクロフォンの感度決定に関する従来の方式とその問題点

第2章では、まず、序論で述べた既存の可逆校正法の理論的な背景について詳細に論じ、従来の可逆校正法において問題点が生じる原因を明らかにした。それを踏まえ、測定時間が長いという問題点を解決するために、音響系のインパルス応答を求める際に広く用いられている時間引き延ばしパルスを導入し、可逆校正法の音響伝達関数を全周波数帯域にわたり一気に測定する手法を検討した。その結果、既存の可逆校正法と比べ、時間引き延ばしパルスを使用することにより測定時間が大幅に短縮された。

しかし、時間引き延ばしパルスの同期加算回数を増やすことにより、低周波帯域の感度差がだんだん小さくなるが、周波数が高くなるに連れその差は大きくなった。信号長とサンプリング周波数を変えながら検討を進めたが大きな改善には至らなかった。即ち、既存法に比べ、時間引き延ばしパルスを導入することにより測定時間の大幅な短縮という目的は実現できたが、この方法

を標準マイクロフォン感度測定法として利用するには改善すべき問題点が多いと言える。

第3章 マイクロフォン振動膜の振動測定によるマイクロフォン感度決定法の提案

可逆校正法における(1)～(3)番目の問題点を解決するために、レーザドップラー振動計を使用する新たな計測手法を提案した。提案法は、レーザドップラー振動計を使用して振動膜の振動を直接測定し、境界要素法の数値解析によりマイクロフォン振動膜の共振周波数と減衰係数を求める方法である。提案法の有効性を確かめるために行った実験結果、使用された標準マイクロフォンの公称値に近い共振周波数と減衰係数値が得られ、提案法の有効性が確認された。また、測定の標準偏差は最大で約1.3%であり測定の再現性が極めて高く、10回の測定に必要な時間が30分未満で、既存法の数十時間よりも大幅な時間短縮が得られた。

次に、体積速度平均モデルを用いて感度を測定するために、振動膜中心の表面速度と、振動膜表面振動によって誘導される音響体積速度との関係を検討し、表面の速度分布を測定する手法を提案した。提案法の妥当性を検証するために、6つのサンプルで推定された標準マイクロフォンの平均モデルを求め、既存の可逆校正法で得られた結果と比較を行った。更に、モデルの普遍性を確認するため、leave-one-out法に基づく誤差検証を実施した。その結果、提案法で得られたマイクロフォンの感度は、従来法によって求めた結果と比較して最大約0.1dBの差があり、高精度測定法であることを確認した。

提案法は既存の可逆校正法と比べて、手続きが簡単であるという利点があり、一つの校正プロセスに対して一つのハードウェアの設定のみが必要であり、マイクロフォンとカプラーを入れ替える手間が省ける利点がある。ただし、本章で提案した手法は可聴周波数領域に限定したものであり、20 Hz以下の帯域での低SNR問題点を克服するためには更なる検討が必要と考えられる。

第4章 レーザ干渉計を用いた低周波数領域のマイクロフォン感度決定法の提案

現在、社会的関心が高まっている超低周波音、即ち20 Hzより低い周波数帯域での低SNR問題点を克服するために、従来よりレーザピストンフォンシステム法が使用されている。しかし、従来のレーザピストンフォン法では、変位を求めるためにフリンジカウント法に基づくホモダイン干渉計が使用しており、移動方向を得られないため位相情報の決定ができない問題点があった。

そこで本章では、レーザ干渉計を用いた低周波数帯域のマイクロフォン感度測定法を提案した。提案法は、低周波数に対するマイクロフォン感度の振幅および位相を校正するものであり、レーザ検出器から得られた直交信号に正弦近似法を適用することによって感度を求める。提案手法の性能を評価するために、1/3オクターブ帯域間隔で2-40 Hzまでマイクロフォンの感度を求める実験を実施した。2-20 Hzの周波数範囲で従来法と比較した結果、感度値が不確度と標準偏差の範囲内ではほぼ一致していることが確認できた。これから、提案システムを用いて、2-20 Hzまでの低周波数領域でマイクロフォンの感度を校正可能性であると言える。

しかし、2 Hz未満の周波数の場合には、振動加振システムが十分かつ適切な信号の生成ができなかった。また、20 Hz以上の周波数では、ピストンの連結器と横方向運動で高次モードの影響が増加するため、差も増加した。これらから、歪のない正確な正弦波信号を取得するためには、長いストロークの制御部を持つ加振機が必要であり、周波数範囲を1 Hz以下から可聴周波数領域まで拡張した高精度の感度測定を実現するためには、加振部の精密な設計及び測定システムの変更が不可欠であると考えられる。

第5章 レーザ干渉計を用いたマイクロフォンの高精度校正法の提案

従来の可逆校正法は、測定に多大な時間を必要とするだけでなく、低周波数帯域でSN比が低下するという問題点があった。そのため、社会的関心が高まっている可聴周波数の下限以下から可聴周波数帯域の上限付近まで、広範囲にわたりマイクロフォンの高精度な校正が可能なシステムの実現が極めて重要である。そこで本章では、第4章で提案したレーザ干渉計システムを、第3章で検討したマイクロフォン表面測定に適用することにより、広帯域化を図る。Fig.5-1に、マイクロフォン感度を校正するための、提案法の基本的な設計手順を示す。

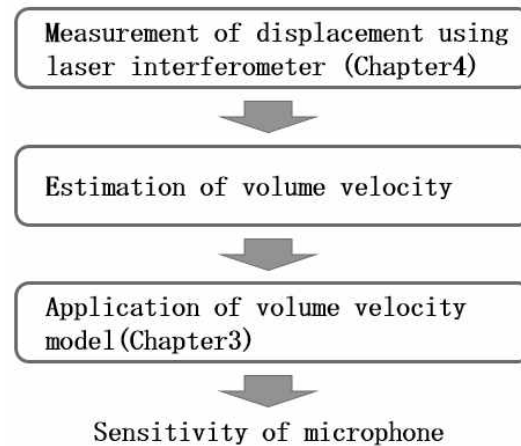


Fig.5-1. Procedure to measure the microphone sensitivity by chapter 5

図のように、第4章で提案したレーザ干渉計を用いて光検出器で検出される信号を取得し、その信号からピストンの変位を求めた。次に、得られた変位から振動膜の体積速度を推定し、最後に、第3章で提案した体積速度平均モデルを用いてマイクロフォンの感度を求めた。測定された振動膜の変位値を第4章の計算過程に適用して計算機シミュレーションを実施した結果、第3章で測定した変位値とほぼ一致した変位値が得られた。このことから、本章における、レーザ干渉計を用いマイクロフォンダイアグラムの変位に第3章で提案した体積速度平均モデルを用いた感度測定手法を組み合わせるといった提案方法は、広帯域にわたって高い精度で測定可能な新しい手法であると考えられる。

しかしながら、本章の計算機シミュレーション結果は、提案システムの妥当性を検証し、提案法の可能性を示したものであり、今後実システム上でその有効性を検討する必要があると考えている。

第6章 結論

既存の可逆校正法は、高い精度で標準マイクロフォンの校正が可能な優れた手法である。しかし、従来法は測定に長い時間を要するだけでなく、低周波数帯域では測定におけるSN比が低下するなどの問題点がある。そこで本研究では、既存法の問題点を解決するとともに、社会的関心の高まっている可聴周波数の下限以下から可聴周波数帯域の上限付近までの、広範囲にわたるマイクロフォンの高精度校正が可能な測定システムの実現を目指した。

第3章では、レーザドプラ振動計を用いた校正法を提案した。この方法は短い測定時間で測定が可能で良好な精度が得られるものの、精度がレーザドプラ振動計の精度に左右されるとともに、20 Hz以下の周波数帯域では十分な精度が得られないという問題点がある。そこで第4章では、低周波数域での高精度な測定を可能にするために、校正にピストンフォンを用い、その膜面の振動振幅をレーザ干渉計により校正する方法を提案した。これにより、2 Hz以上の帯域で高精度校正を実現できることを示した。これは、第3章で開発した方法と第4章で開発した手法を組み合わせることで、研究の目的に叶う測定が可能になることを示している。しかし、できるだけ簡便に測定を行うには、統一的な方法で高精度かつ広帯域な測定を実現すべきと考えられる。

そこで第5章では、第4章で提案されたレーザ干渉計を用い、マイクロフォンダイアグラムの変位に、第3章で提案した体積速度平均モデルを用いた感度測定手法を組み合わせることにより、広い帯域にわたって高精度の測定が期待できる新しい方法を提案した。これにより、本研究の最終目的である、可聴周波数の下限以下から可聴周波数帯域の上限付近までの広範囲にわたり、マイクロフォンの高精度校正が可能な測定システムの実現の可能性が示唆された。ただし、提案システムはシミュレーションの結果のみであり、今後実システム上で有効性を検討する必要があると考えられる。

本研究で提案した手法は、他の関連された物理量で校正された測定機器や基準物に依存しないことから、今後、一次校正として更に広帯域かつ高精密校正が可能なシステムの実現へ貢献できること、また、測定技術開発の基礎となることを期待する。

論文審査結果の要旨

音圧は、様々な音響機器の設計や利用、環境騒音の評価などをみても明らかなように、極めて重要な物理量である。したがって、高精度マイクロフォンの感度決定と維持のための高精度な音圧感度測定法、即ち校正法が求められる。従来、3 個のマイクロフォンの比較による可逆校正法が最も優れたマイクロフォン校正法とされている。しかし、可逆校正法は測定に多大な時間を要するばかりでなく、低周波数域では SN 比低下に伴う精度の低下という問題点を持つ。そこで、著者はレーザによる計測法に着目し、広い周波数帯域にわたる高精度マイクロフォン感度の測定を短時間に行いうる技術の研究開発を進めてきた。本論文は、その成果をまとめたもので全編 6 章からなる。

第 1 章は序論であり、研究の背景と目的を述べている。

第 2 章では、従来の可逆校正法の詳細を述べ、その問題点が測定時間の長さや低周波数域における精度の低下にあることを示している。さらに、可逆校正法の問題点である測定時間の長さを短縮する手段として広帯域にわたる測定をまとめて行うため、可逆校正法を伝達関数の形で定式化し、実際に時間引き延ばしパルスを用いて広帯域同時測定を行っている。その結果、大幅な時間短縮が認められたものの、精度面で検討の余地が残されたとしている。これは長い経験に基づく良好な論考である。

第 3 章では、測定時間の短縮を図る手段として、マイクロフォン振動膜の振動をレーザドップラ計測法によって測定する音圧感度測定方法を提案している。マイクロフォンの振動膜の中心の振動速度を 1 回の測定で求め、可逆校正法で校正済みの高精度マイクロフォンの振動膜中心の速度と振動膜の音響体積速度との関係を表す体積速度平均モデルを構築し、これらの値から音圧を求めている。これは、1 点の測定で音圧の高精度測定を可能とする提案であり、重要な成果である。

第 4 章では、低周波数域における精度低下への対策として、低周波数域の性能に優れるピストンフォンを用いた測定法の改善提案を行っている。レーザ干渉計を用いたピストンフォン振動振幅の絶対測定の結果からマイクロフォンの感度を測定する技術を提案し、その有効性を検討した結果、2～20 Hz の超低周波数域で良好な測定が可能であることを確認している。これは、他の物理量で校正された測定機器や基準物に依存しない絶対測定を行うレーザ干渉計を応用した改善の試みであり高く評価できる。

第 5 章では、レーザ干渉計を光学系として用いたマイクロフォン振動膜面の絶対測定結果に第 3 章で提案した体積速度推定モデルを適用することにより、広い周波数帯域にわたり高い精度が得られるマイクロフォン感度測定法を提案している。これは優れたマイクロフォン校正法の提案として高く評価できる。

第 6 章は結論である。

以上要するに本論文は、短時間の測定で広帯域、高精度な音圧校正を可能とするマイクロフォン音圧感度測定法を提案し、今後の音響測定技術の高度化に向け新たな知見を与えたもので、音響情報学ならびにシステム情報科学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。